不同光质补光对火龙果茎生理特性及开花结果的影响

谢佐沐[1]，蔡英健[1]，余若莹[1]，俞超[1*]，汪财生[1]，付美[1]，郭斌[2]

（1. 浙江万里学院生物与环境学院，浙江 宁波 315100；2. 宁波传奇农业科技有限公司，浙江 宁波 315100）

摘 要：为探究不同光质补光对火龙果(*Hylocereus polyrhizus*)茎生理特性的影响，该文采用红光、白光、蓝光 3 种不同光质对火龙果进行夜间补光，测定火龙果茎中可溶性糖、可溶性蛋白、叶绿素、线粒体蛋白、线粒体膜电位及细胞分裂素（CTK）、吲哚乙酸（IAA）、赤霉素（GA）三种内源激素的含量，并统计茎长、开花数、果实产量相关指标。结果表明：3 种光质补光均可提高火龙果植株可溶性蛋白质含量，补白光效果最佳；3 种光质补光均可显著提高火龙果植株可溶性糖的含量，补蓝光效果最佳；补白光有利于叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量增加，补红光对其影响不显著，而补蓝光会降低其含量；补白光和蓝光均能显著降低 CTK 含量，补白光和红光均能显著提高 IAA 含量，补红光和蓝光均能显著提高 GA 含量；补白光显著降低线粒体蛋白含量，3 种光质补光对线粒体膜电位均无明显影响；3 种光质补光对火龙茎的生长无显著影响，补红光和白光能显著提高开花率，补红光能显著提高果实产量。综合以上结果可得，补红光与白光对火龙果茎代谢产物、叶绿素、内源激素含量及开花数、果实产量有较明显的促进效果，该研究结果为光质调控技术促进火龙果植株的生长发育、开花结果提供借鉴。

关键词：火龙果，光质，补光，茎，生理特性，开花结果

中图分类号：Q945　　　　**文献标识码：**A

Effects of different supplemental light on physiological characteristics, flowering and fruiting of pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) stem

XIE Zuomu[1], CAI Yingjian[1], YU Ruoying[1], YU Chao[1*], WANG Caisheng[1], FU Mei[1], GUO Bing[2]

（1. *College of Biological and Environmental Sciences of Zhejiang Wanli University*, Ningbo 315107, Zhejiang, China; 2. *Ningbo Legend Agricultural Technology Co*., *Ltd* , Ningbo 315100, Zhejiang, China）

Abstract: To investigate the effects of different supplemental light on physiological characteristics of pitaya stems, red, white and blue light were used as supplemental light source at night. The contents of soluble sugar, soluble protein, chlorophyll, mitochondrial protein, mitochondrial membrane potential and three endogenous hormones (CTK, IAA, GA) were determined. The indicators of stem growth, flowering, fruit yield were counted. The results were as follows: Supplementing this three kinds of light could all increase the soluble protein content in pitaya stems, and the white light had the best effect; Supplementing this three kinds of light could all significantly increase soluble sugar content in pitaya stems, and the blue light had the best effect; Supplementing white light was beneficial to increase the content of chlorophyll a and b, and supplementing red light had no significant effect on it, while blue light would reduce its content; Supplementing white light and blue light could significantly reduce the CTK content, supplementing white and red light could significantly increase the IAA content, and supplementing red light and blue light could significantly increase the GA content; Supplementing white light could significantly reduce the mitochondrial protein content and the three kinds of

基金项目：浙江省公益技术应用农村农业项目（LGN18C150002）；宁波市公益重大科技项目（2019C10005）；宁波市农业科技公益项目（202002N3015）[Supported by the Zhejiang Province Public Welfare Technology Applied Research Project(LGN18C150002); Major Public Welfare Science and Technology Projects of Ningbo(2019C10005);　Public Welfare Project of Ningbo(202002N3015)]。

作者简介：谢佐沐（2000-），研究方向为植物生理学，（E-mail）1771172678@qq.com。

[*]**通信作者：**俞超，硕士，高级实验师，研究方向为植物生理学，（E-mail）yuchao.wanli@qq.com。

supplement light had no obvious effect on the mitochondrial membrane potential; Supplementing the three kinds of light had no significant effect on the growth of pitaya stems, while supplementing red and white light could significantly increase the flower formation rate, and supplementing red light could significantly increase the fruit yield. Comprehensive analysis deemed that supplementing red light and white light had obvious promoting effect on the contents of metabolites, chlorophyll, endogenous hormones of pitaya stems, flower formation rate and fruit yield. The research results could provide a reference for a technology of light quality controlling to improve the growth and development pitaya plants.

Key words: pitaya, light quality, light supplement, stem, physiological characteristics, flowering and fruiting

光是植物生长必不可少的环境因子之一，而光质是影响植物品质的关键因素（张勤涛等，2018），与植物光合特性、生理指标、酶活性等密切相关。红光和蓝光是植物吸收和利用最多最重要的有效光源 (Abidi et al., 2013)。红光通过调控植物光敏色素和光合器官，促进胚胎发育和化学物质合成(Choi et al., 2015)，有利于茎叶生长并提高作物产量(Zhang et al., 2019)。蓝光与叶绿体形成、气孔开闭以及叶绿素、花青素的生物合成有密切关系(Li & Kubota, 2009)，能促进植物幼苗茎的伸长、降低生物量(Folta, 2004)。光照时间也是影响植物生长发育和形态建成的重要因素，调控植物成花和花性分化，还影响植物的营养生长和生理生化过程(尹钧，2016)。暗期补光是设施栽培中广泛使用的环境调节技术，可以加快植物营养体的构建，促进植株生长（申宝营等，2014）。该技术有利于增加幼苗的叶面积，提高叶片中叶绿素含量和净光合速率，并改变植物体内的激素含量，不同程度地提高植株可溶性糖、可溶性蛋白、游离氨基酸含量以及过氧化物酶(POD)活性（徐超华等，2013）。

火龙果（*Hylocereus polyrhizus*）为仙人掌科（Cactaceae）量天尺属（*Hylocereus* Britton & Rose）植物，原产于中美地区，现广泛种植于广西、广东、海南、福建、贵州等地区。火龙果为长日照作物，最适条件为温度 25~35℃、光照时间 12 h，一般于 6—11 月结果。火龙果反季节技术研究表明，补光可以促进火龙果开花，延长花期至 12 月（Jiang et al., 2012）。黄秋凤等（2019）研究表明，在葡萄的不同生长时期进行补光，会对果实品质造成明显影响。目前，浙江省的秋冬季节已广泛开展火龙果人工补光，诱导成花效果良好，并显著提高火龙果产量和果实品质（顾鑫慧等，2020）。然而，在 7—9 月火龙果采摘上市的旺季，相比中国广西、广东和越南等外地产火龙果，中国浙江本地产火龙果个头小、数量少，不具备价格和产量优势，能否利用光调控技术促进该时期火龙果生长及开花结果尚未可知。本研究以红心火龙果为试验材料，探究红、白、蓝 3 种光质补光对火龙果茎中可溶性蛋白、可溶性糖、叶绿素、线粒体、内源激素含量，以及火龙果茎生长、开花结果的影响，旨在利用光调控技术壮实火龙果枝条，促进树体积累养分、为开花结果提供良好的营养条件。

1　材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2020 年 1—9 月在宁波市雅岛果蔬专业合作社火龙果种植基地进行，选取树龄三年以上健壮无病、已经能正常结果的红心火龙果品种‘柬埔寨红’，采用大棚内钢筋水泥柱独立式支架种植方式，架高 1.4 m，种植 3 行，每行 76 株，株行距 160 cm × 80 cm，每柱保留有效结果枝 12~20 条。晴天大棚内日均光强为 240 μmol • m^{-2} • s^{-1}，平均日照时间 11 h。每隔 4 d 浇水施肥一次，每次每株平均灌水量为 1.5 L，平均施肥量为 3.23 g（1.37 g 硝酸钾、0.34 g 磷酸二氢铵、0.38 g 硫酸镁、0.90 g 四水硝酸钙和 0.24 g 尿素）。

补光试验组分别在4个间隔20 m的大棚中开展，分别为补红光组R（波长650 nm）、补蓝光组B（波长450 nm）、补白光组W（波长450~465 nm），不补光为对照组（CK），每组120株火龙果。

补光试验中，在距离火龙果植株上部30 cm处安装T8一体化LED红色/蓝色/白色灯管（1.2 m，18 W），灯下方火龙果枝条表面光强为150~220 lx，灯间距50 cm，每行安装10根，日落后每天在18:00—22:00持续补光。取样时间为2020年7—9月，每月15日、30日取样，每次取样采集最靠近光源、位于水泥柱上方的茎段50根。

1.2 指标测定

1.2.1 可溶性蛋白

采用 BCA 法测定可溶性蛋白含量。称取 1.0 g 茎段，研磨离心后按照 BCA 蛋白定量试剂盒（Solarbio PC0020，北京索莱宝科技有限公司）说明书进行可溶性蛋白含量测定。

1.2.2 可溶性糖

采用蒽酮法测定可溶性总糖含量。称取 1.0 g 茎段，研磨后烘干至恒重，沸水溶解后抽滤，定容至 100 mL，将 1 mL 提取液与 4 mL 蒽酮溶液混合，煮沸 10 min，用分光光度计（HITACHI F-7100，日本日立公司）测量波长 620 nm 下的吸光度值，制作葡萄糖标准曲线后计算可溶性总糖含量。

1.2.3 叶绿素

称取 0.2 g 茎段，剪碎后放入试管，加入 10 mL 丙酮乙醇混合溶液（1:1）浸泡，每隔 2 h 充分振荡，24 h 后用丙酮乙醇混合溶液（1:1）定容至 25 mL，测量样品在波长 645、663 nm 下的吸光度，依据 Arnon 公式计算叶绿素的含量（刘遵春等，2014）。

1.2.4 激素

采用酶联免疫吸附法（ELISA）测定激素含量。称取 1.0 g 茎段放入 50 mL 离心管中，冷冻型高通量组织研磨器（SCIENTZ-48L，宁波新芝生物科技有限公司）研磨匀浆后，离心机（Eppendorf 5417R，德国艾本德公司）3 000 *g* 离心 10 min，分别按照赤霉素试剂盒（上海桥杜生物科技有限公司 PT96031）、吲哚乙酸试剂盒（上海桥杜生物科技有限公司 PT96035）、细胞分裂素试剂盒（上海桥杜生物科技有限公司 PT97115）说明书步骤检测茎中细胞分裂素（CTK）、吲哚乙酸（IAA）以及赤霉素（GA）的含量。

1.2.5 线粒体蛋白及线粒体膜电位

称取 1.0 g 茎段，研磨后按照植物线粒体提取试剂盒（BestBio BB-3611）说明书提取完整线粒体，使用 BCA 蛋白定量试剂盒（Solarbio PC0020）测定线粒体蛋白含量。纯化后的线粒体根据膜电位检测试剂盒（Solarbio M8650）测定其膜电位，设置荧光分光光度计（HITACHI F-7100，日本日立公司）的激发波长 525 nm，发射波长 590 nm，狭缝宽度 5 nm，以单位质量火龙果茎线粒体产生的荧光强度表示线粒体膜电位的大小（姚婷婷等，2010）。

1.2.6 茎长、茎围、开花数

7 月初每个处理随机标记 100 根枝条，7—9 月每月 30 日用卷尺测量标记样本的茎长和枝条中部的三棱茎围。统计 7—9 月每批次标记枝条的开花数目。

1.2.7 果实大小和产量

在果实成熟期采摘果实，称重后计算各个处理区域的总产量。每个处理随机抽取 50 个果实，卷尺测量果实的横径和纵径。

1.3 统计与分析

采用软件 Microsoft Excel 2013 和 IBM SPSS 26.0 进行数据处理，数据方差分析方法为邓肯（Dun-can）单因素分析法，不同字母表示各试验差异显著（α=0.05）。

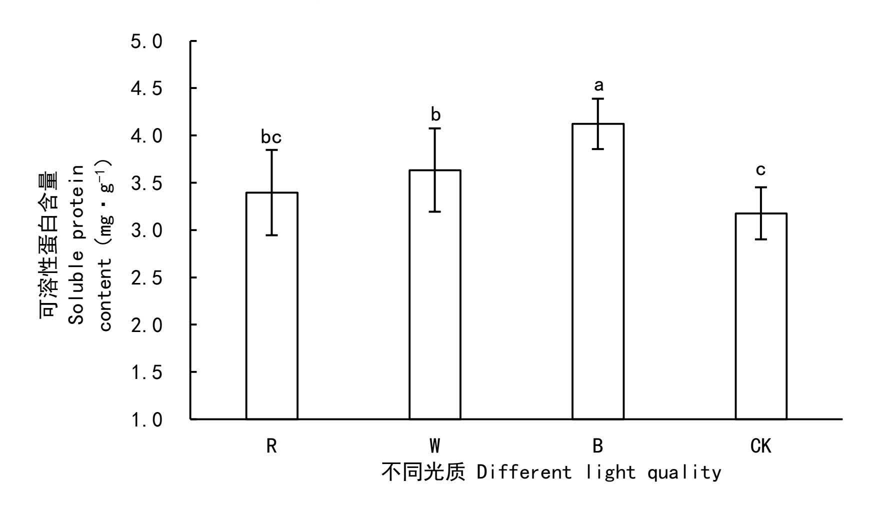
2 结果与分析

2.1 不同光质对红龙果茎可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响

由图 1 可知，补蓝光、白光火龙果茎中的可溶性蛋白含量均显著高于 CK。补蓝光火龙果茎中的可溶性蛋白含量最高，高于 CK 29.7%；补白光高于 CK 14.4%；补红光火龙果茎可

溶性蛋白的含量略有增加，高于 CK 6.9%，但差异不显著。结果表明，3 种光质补光均可促进火龙果植株可溶性蛋白质合成，且补蓝光效果最佳。

由图 2 可知，补红光、白光、蓝光的火龙果茎可溶性糖含量均显著高于 CK。补白光茎中的可溶性糖含量最高，高于 CK 68.8%；补红光茎中的可溶性糖含量高于 CK 39.0%；补蓝光茎中的可溶性糖含量高于 CK 27.6%。结果表明，3 种光质补光均可明显促进火龙果植株可溶性糖的积累，且补白光效果最佳。



R. 红光；**W**. 白光；**B**. 蓝光；**CK**. 对照。不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

R. Red light；**W**. White light；**B**. Blue light；**CK**. Control. Different small letters mean significant differences among different treatments (P < 0.05). The same below.

图 1 不同光质补光对火龙果茎可溶性蛋白含量的影响

Fig.1 Effects of different supplemental light on soluble protein content of pitaya stem

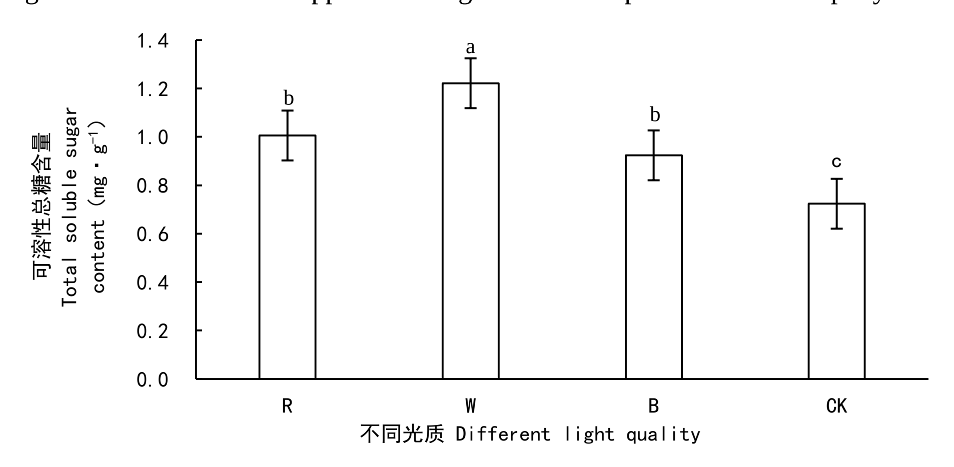


图 2 不同光质补光对火龙果茎可溶性糖含量的影响

Fig.2 Effects of different supplemental light on soluble sugar content of pitaya stem

2.2 不同光质补光对火龙果茎叶绿素含量的影响

不同光质补光后，火龙果茎叶绿素含量见图 3。与 CK 相比，补白光火龙果茎中叶绿素 a、b 含量分别显著增加了 21.4%、25.0%。补蓝光后，茎中叶绿素 a 含量相比 CK 显著下降了 7.14%，叶绿素 b 和总叶绿素含量也略低于 CK，但差异不显著。补红光火龙果叶绿素 a、b 与总叶绿素含量与 CK 差异均不显著。

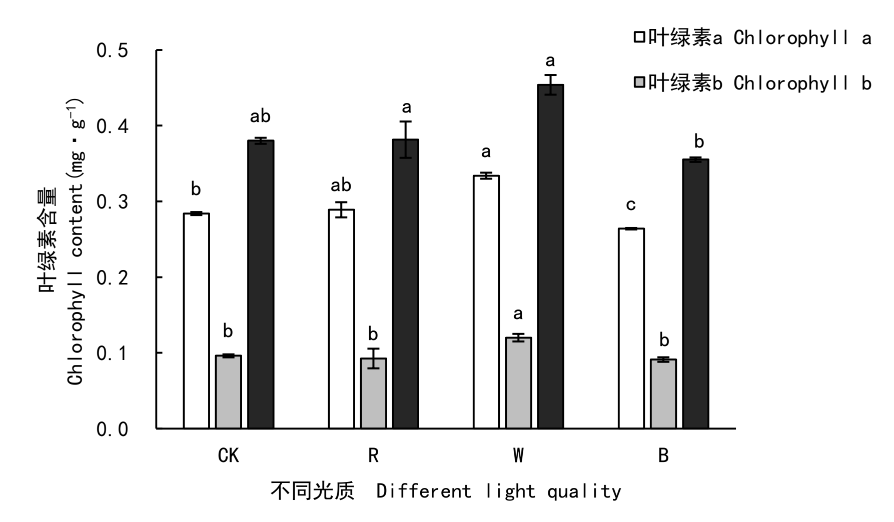


图 3 不同光质补光对火龙果茎叶绿素含量的影响

Fig.3 Effects of different supplemental light on chlorophyll content of pitaya stem

2.3 不同光质补光对红龙果茎内源激素含量的影响

由图 4 可知，补红光火龙果茎中 CTK 含量最高（0.781 mg·g^{-1}），高于 CK 5.3%，但差异不显著；补白光和蓝光火龙果茎中的 CTK 含量均显著下降，分别低于 CK 4.5%和 11.1%。

补白光和红光均能显著提高火龙果茎中 IAA 的含量，补白光茎中 IAA 含量最高（0.891 mg·g^{-1}），补红光其次（0.863 mg·g^{-1}），分别高于 CK 11.8%和 8.3%。补蓝光茎中的 IAA 含量与 CK 相近，几乎无影响。

补红光和蓝光均能显著提高火龙果茎中 GA 的含量，补红光茎中 GA 含量最高（0.472 mg·g^{-1}），其次为补蓝光（0.451 mg·g^{-1}），分别高于 CK 25.5%和 19.9%。补白光略高于 CK，但差异不显著。

综上所述，补红光能提高火龙果茎中 CTK、IAA 和 GA 的含量；补蓝光能降低火龙果茎中 CTK 含量，增加 GA 含量，不影响 IAA 含量；补白光能提高火龙果茎中 IAA 与 GA 含量，降低 CTK 含量。

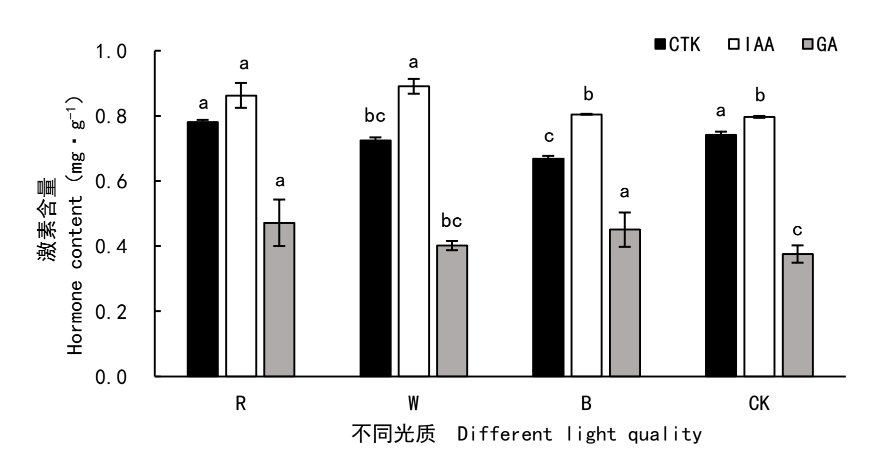


图 4 不同光质补光对火龙果茎激素含量的影响

Fig.4 Effects of different supplemental light on hormone content of pitaya stem

2.4 不同光质补光对红龙果茎线粒体蛋白、线粒体膜电位的影响

由图 5 可知，红光、白光、蓝光 3 种补光处理均会使火龙果茎中线粒体蛋白含量下降，补白光茎中线粒体蛋白含量最少，低于 CK 33.3%，达到显著水平，补蓝光和红光茎中线粒体蛋白含量与 CK 差异不显著。由图 6 可知，补蓝光、白光均能提高火龙果茎的线粒体膜电位，分别高于 CK 27.8%、11.1%，但差异均不显著。补红光后茎线粒体膜电位下降，低于

CK 11.1%，但差异不显著，表明 3 种光质补光对茎线粒体膜电位影响不明显。

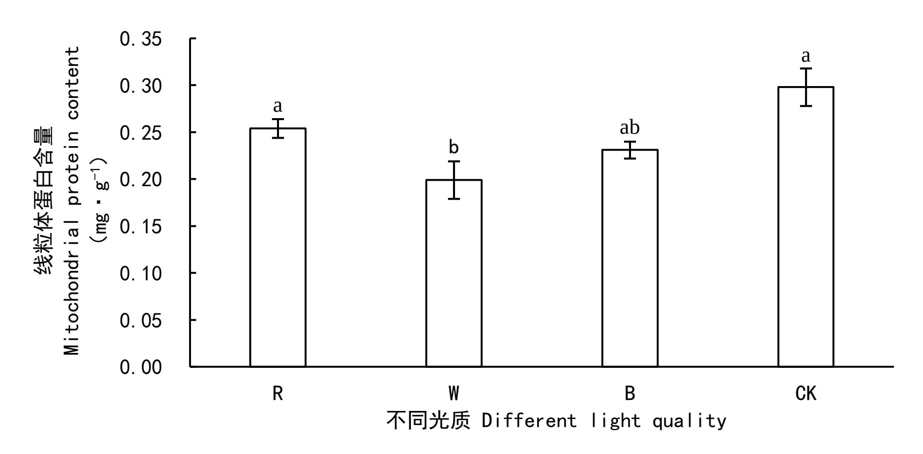


图 5 不同光质补光对火龙果茎线粒体蛋白含量的影响

Fig.5 Effects of different supplemental light on mitochondrial protein content of pitaya stem

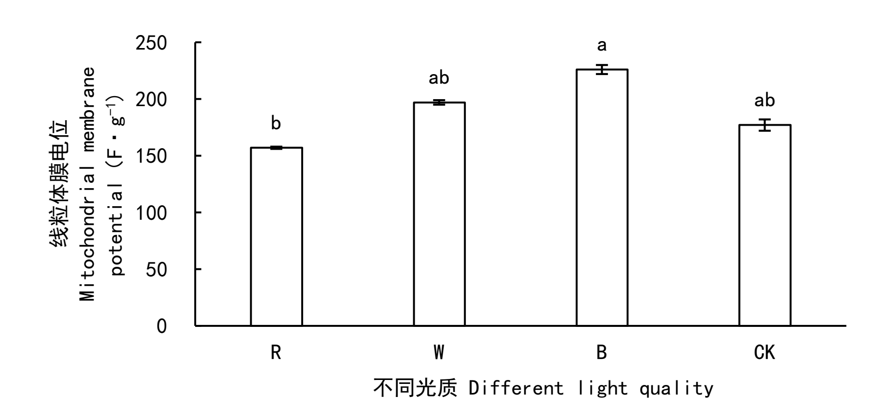


图 6 不同光质补光对火龙果茎线粒体膜电位的影响

Fig.6 Effects of different supplemental light on mitochondrial membrane potential of pitaya stem

2.5 不同光质对红龙果茎长、茎围和开花数的影响

由表 1 可知，3 种光质补光的火龙果茎长、茎围与 CK 相比，均无显著差异，表明光质补光对火龙果茎的生长几乎无影响。7 月，第一批补红光火龙果首花日期比其他补光处理提前 5 天。3 种补光处理之间的开花数目差异显著。其中：补红光和白光的开花数目显著高于 CK，分别提高了 26.7%、12.5%；补蓝光与 CK 差异不显著。结果表明，补红光和白光的促进开花效果最佳。

表 1 不同光质补光对火龙果茎生长及开花的影响

Table 1 Effects of different supplemental light on the stem growth and the first flowering of pitaya

处理 Treatment	茎长 Stem length（cm）	茎围 Stem diameter（cm）	开花数 Flowers number
R	83.25±2.26a	18.51±1.19a	626.73±4.07a
W	81.63±4.14a	18.15±4.02a	556.44±4.31b
B	82.66±4.34a	18.27±3.57a	503.69±3.61c
CK	82.81±2.08a	18.34±2.36a	494.55±4.48c

R. 红光；**W**. 白光；**B**. 蓝光；**CK**. 对照。不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

R. Red light；**W**. White light；**B**. Blue light；**CK**. Control. Different small letters mean significant differences

among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

2.6 不同光质对红龙果果实的影响

由表 2 可得，3 种光质补光处理后，果实纵向最大周长与横向最大周长与 CK 无显著差异，表明 3 种光质补光对火龙果果型均无显著影响。3 种补光处理之间果实产量差异显著，其中：补红光果实的产量最大，补白光其次，分别高于 CK 17.4%、11.5%，且差异显著；补蓝光与 CK 差异不显著。结果表明，补红光和白光对于提高果实产量效果最佳。

表 2 不同光质补光对火龙果果实的影响

Table 2 Effects of different supplemental light on pitaya fruit

处理 Treatment	纵向最大周长 Longitudinal maximum perimeter(cm)	横向最大周长 Transverse maximum perimeter(cm)	产量 Yield (kg·m^{-2})
R	31.88±1.14a	26.77±1.44a	88.11±2.49a
W	30.71±2.42a	26.89±2.12a	83.73±3.67b
B	30.74±2.69a	26.32±2.11a	77.68±3.88c
CK	31.07±1.99a	25.65±1.88a	75.08±3.19c

3 讨论与结论

光质对高等植物的糖代谢和氮代谢具有调节作用。可溶性糖是植物体内碳水化合物转化和再利用的主要物质，反映了植株糖代谢状况；植物体中参与各种代谢的酶类大多是可溶性蛋白，其含量是判断植物氮代谢能力的重要依据（兰明忠，2019）。本研究发现补蓝光可显著增加火龙果茎可溶性蛋白含量，补白光可显著增加火龙果茎中的可溶性糖含量，与石蒜（李青竹等，2019）、砚根（谢苗苗等，2018）、青葱（高松等，2020）等植物相一致，表明蓝光能促进火龙果茎的氮代谢，白光有利于火龙果茎合成碳水化合物，促进其糖代谢。补红光可增加火龙果茎中可溶性蛋白和可溶性糖含量，但不如蓝光和白光影响显著（李慧敏和陆晓民，2016；王静等，2017），表明红光对火龙果茎的糖代谢和氮代谢有促进作用。

作为光合作用能源和重要环境信号，光在光合产物合成和光形态发生中起重要作用。植物生长主要通过光合作用来实现，光合色素含量在一定程度上反映出光合作用强度，其中叶绿素是主要的光能吸收物质，叶绿素含量的高低直接影响着植物光合作用的光能利用效率（王燕等，2018）。对大多数植物而言，红光处理有利于提高叶片中叶绿素 a、b 和总叶绿素含量，蓝光处理后叶片中叶绿素较低，但能提高叶绿素 a/b 的比值（许莉等，2007；Bian et al., 2015）。本研究中，补白光提高了火龙果茎叶绿素 a、b 和总叶绿素含量，从而促进茎的光合作用及产物积累，与缕丝花、油菜幼苗的研究结论相似（王爱民等，2001；陈志等 2013）；红光处理对火龙果茎叶绿素 a、b 含量影响不显著，蓝光处理则会减少火龙果茎叶绿素 a、b 含量，与许莉等（2007）对莴苣的研究结果有所不同，推测可能与光照时间及物种差异有关。

线粒体是细胞进行呼吸作用的主要场所，通过氧化磷酸化途径产生 ATP。线粒体膜电位是指生物膜两侧离子浓度不同所产生的跨膜电位差，反映线粒体功能的活性，是评价线粒体功能的敏感指标（Zamzami et al., 1995）。研究表明植物衰老过程中会大量积累活性氧自由基(ROS)（Gualanduzzi et al., 2009），过量的 ROS 会引起线粒体膜的氧化损伤，最终引起植物衰老（Qin et al., 2009）。补蓝光及白光均能提高火龙果茎中线粒体的膜电位，显示出较高的线粒体活性，推测原因可能是蓝、白光补光处理增加了火龙果茎中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)等抗氧化酶的活性，从而减少呼吸过程中积累的 ROS 对线粒体的伤害（吕梁，2019）。线粒体蛋白含量是评价线粒体功能的重要指标，与多种生物学功能密切相关，如呼吸电子传递链、三羧酸循环、糖酵解途径、线粒体载体、

防御和胁迫响应等（吕梁，2019）。补白光、蓝光、红光均会导致火龙果茎线粒体蛋白含量有所下降，而补白光处理达到显著水平，表明补白光对线粒体蛋白合成的抑制效果最显著，其对线粒体功能的影响有待进一步研究。

内源激素对植物的生长发育起着重要的调控作用，夜间补光能改变植物体内源激素的含量，提高黄瓜幼苗（李海云和刘焕红，2013）、小麦（冉午玲等，2017）等叶片中的 IAA、GA 含量。本研究中，补白光不仅增加了火龙果茎中 IAA、GA 含量，且茎中叶绿素、可溶性糖、蛋白质含量也均高于对照。推测夜间补光后，GA 与 IAA 含量提高，促进细胞壁扩容进而利于光合作用及光合产物积累。红光和蓝光受体也参与调节植物内源激素的分泌（张曼曼等，2018）。本研究中，补红蓝光能提高火龙果茎中 GA 含量，与番茄幼苗茎一致（郛奇等，2013），原因可能在于红蓝光能调节胚轴细胞对 GA 的敏感性，促进 GA 合成（Yamaguchi & Kamiya, 2001；Reid et al., 2002）。补红光可提高火龙果茎中 CTK 含量，补蓝光降低 CTK 含量，与卢素萍等（2016）研究结果一致，推测不同光质对 CTK 合成和运输效果不同。

补光试验对火龙果茎的生长均无显著影响而对开花结果影响明显，推测原因可能是火龙果作为热带长日照植物，7—9月处于旺盛的生殖生长期，日落后不同光质的补光并不会显著促进火龙果茎的营养生长，而对于花芽的形成更有效。研究表明，光质可以影响植物开花，主要由不同光受体接受光和转导信号来完成。MYB、WRKY、bHLH等转录因子参与调控植物生长发育、次生代谢，在光受体作用下影响植物开花；光受体也可以调控植物激素的合成，进而调节开花（宋佳丽，2016）。本研究中，补红、白光均可以显著提高火龙果的开花率，与越橘（王佳淇等，2020）、铁皮石斛（李茹等，2019）的研究结果一致，结合茎中相关物质的检测结果，推测补白光可以提高茎中代谢产物积累和叶绿素含量并促进开花，可能是光受体激活了转录因子调控途径；补红光可以提高茎中IAA、GA、CTK等激素含量并促进开花，可能是光受体激活了激素调控途径。

综上所述，红光与白光处理下的火龙果茎段的叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白、内源激素等指标均有显著提高。今后的栽培试验中，可设置一定比例的红白光，研究红白光配比对火龙果枝条生长指标、光合呼吸、果实品质产量的影响，为壮实火龙果枝条、提高植株抗逆性、提升火龙果经济效益提供技术参考。

参考文献：

ABIDI F, GIRAULT T, DOUILLET O, et al., 2013. Blue light effects on rose photosynthesis and photomorphogenesis [J]. Plant Biol, 15(1): 67-74.

BIAN ZH, YANG QC, LIU WK, 2015. Effects of light quality on the accumulation of phytochemicals in vegetables produced in controlled environments: a review [J]. J Agric Sci Technol, 95(5): 869-877.

CHEN Z, SUN QL, WANG YT, et al., 2013. Influence of light quality on growth of oil rape seedlings [J]. Agric Eng, 3(6): 143-149. [陈志，孙庆丽，汪一婷，等，2013. 不同光质对油菜幼苗生长的影响[J]. 农业工程，3(6):143-149.]

CHOI HG, MOON BY, KANG NJ, 2015. Effects of LED light on the production of strawberry during cultivation in a plastic greenhouse and in a growth chamber [J]. Sci Hortic, 189(25): 22-31.

FOLTA KM, 2004. Green light stimulates early stem elongation, antagonizing light-mediated growth inhibition [J]. Plant Physiol, 135(3): 1407-1416.

GAO S, LIU XN, LIU L, et al., 2020. Response characteristics of green onion (*Allium fistulosum* L.) to LED light quality under artificial climate chamber[J]. Sci Agric Sin, 53(14): 2919-2928. [高松，刘学娜，刘颖，等，2020. 人工气候室控制条件下青葱对 LED 光质的响应特性［J］.

中国农业科学，53(14)：2919-2928.]
GUALANDUZZI S, BARALDI E, BRASCHI I, et al., 2009. Respiration, hydrogen peroxide levels and antioxidant enzyme activities during cold storage of zucchini squash fruit [J]. Postharvest Biol Technol, 52(1): 16-23.
GU XH, WANG B, WU YL, et al., 2020. Effects on flowering period and quality of red Pitaya of supplemental treatment of different light quality in autumn and winter [J]. J Zhejiang Wanli Univ, 33(5): 96-100. [顾鑫慧，王碧，吴忆兰，等，2020. 不同光质补光处理对秋冬季红心火龙果花期和品质的影响[J]. 浙江万里学院学报，33(5)：96-100.]
HUANG QF, XIE SY, CAO MM, et al., 2019. Effects of supplementary illumination at night on leaf nutrition and fruit quality for spring fruit of Kyoho grape [J]. J Southern Agric, 50(4): 781-787. [黄秋凤，谢蜀豫，曹慕明，等，2019. 夜间补光对巨峰葡萄春果叶片营养及果实品质的影响[J]. 南方农业学报，50(4)：781-787.]
LAN MZ, 2019. Effect of LED lights quality on the growth and photosynthesis of *Nageia nagi* seedlings [J]. Subtrop Agric Res, 15(3): 184-188. [兰明忠，2019. LED 光质对竹柏幼苗生长和光合作用的影响[J]. 亚热带农业研究，15(3)：184-188.]
LI HY, LIU HH, 2013. Effects of supplementary illumination at night on hormones content and nutrient absorption of cucumber seedlings [J]. Chin Agric Sci Bull, 2013, 29(16): 74-78. [李海云，刘焕红，2013. 夜间补光对黄瓜幼苗激素含量及养分吸收的影响[J]. 中国农学通报，29(16)：74-78.]
LI R, LI ZL, SHANG ZR, 2019. Effects of different light quality of LED on flowering of *Dendrobium officinale* Kimura et Migo *in vitro* [J]. J Southern Agric, 50(7): 1550-1556. [李茹，李枝林，商正蕊，等，2019. 不同 LED 光质对铁皮石斛瓶内开花的影响[J]. 南方农业学报，50(7): 1550-1556.]
LIU ZC, FENG AY, HU HL, 2014. Study on chlorophyll extraction methods of leaf in persimmon [J]. J Henan Inst Sci Technol, (42): 12-15. [刘遵春，冯爱英，扈惠灵，2014. 柿树叶片叶绿素含量测定方法比较研究[J]. 河南科技学院学报，(42)：12-15.]
LI Q, KUBOTA C, 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce [J]. Environ Exp Bot, 67(1): 59-64.
LI QZ, CAI YM, YANG Z, et al., 2019. Effects of the quality of LED light on the growth, physiological characteristics, and the accumulation of alkaloids in *Lycoris radiate* [J]. Chin J Appl Environ Biol, 25 (6) : 1414-1419. [李青竹，蔡友铭，杨贞，等，2019.不同 LED 光质对石蒜幼苗生长、生理和生物碱积累的影响[J]. 应用与环境生物学报，25(6)：1414-1419.]
LI HM, LU XM, 2017. Effects of light quality on flowering, dynamic variation in physiological characteristics of pakchoi during budding and flowering stage[J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 36(4): 730-737.[李慧敏，陆晓民，2017. 不同 LEDs 光质下普通白菜开花以及花期生理特性的动态变化[J]. 西北植物学报，36(4): 730-737.]
LU SP, ZHAO MQ, LIU PF, et al., 2016. Effect of light quality on endogenous hormone content and lipid peroxidation of membrane system during aging process of flue-cured tobacco leaf [J]. J Agric Sci Technol, 18(6): 44-51. [卢素萍，赵铭钦，刘鹏飞，等，2016. 光质对烤烟叶片衰老过程中内源激素含量和膜脂过氧化的影响[J]. 中国农业科技导报，18(6)：44-51.]
LÜ L, 2019. Mitochondrial energy metabolism and reactive oxygen species involved in early defense responses against pink rot and Si induced resistance of harvested muskmelons[D]. Gansu: Gansu Agricultural University: 15-19. [吕梁，2019. 线粒体能量代谢和活性氧在粉霉病侵染及硅诱导甜瓜果实早期防御响应中的作用[D]. 甘肃：甘肃农业大学：15-19.]

JIANG YL, LIAO YY, LIN TS, et al., 2012. The photo-period-regulated bud formation of red pitaya（*Hylocereus* sp.）[J]. Hort Sci, 47(8): 1063-1067.
QIN GZ, MENG XH, WANG Q, et al., 2009. Oxidative damage of mitochondrial proteins contributes to fruit senescence: a redox proteomics analysis [J]. J Proteome Res, 8(5): 2449-2462.
RAN WL, GUO JM, MA Y, et al., 2017. Effect of supplemental illumination at night on endogenous plant hormones content and photosynthetic characteristics in wheat leaves [J]. J Tritic Crops, 2017, 37(9): 1181-1186. [冉午玲，郭家萌，马野，等，2017. 夜间补光对小麦叶片激素含量及光合特性的影响[J]. 麦类作物学报，37(9)：1181-1186.]
REID JB, BOTWRIGHT NA, SMITTH JJ, et al., 2002. Control of *gibberellin* levels and gene expression during-etiolation in pea [J]. Plant Physiol, 128(2): 734-741.
SHEN BY, LI YN, ZHAO SQ, et al., 2014. Effect of dark period lighting regulation on cucumber seedling morphology and comprehensive evaluation analysis and comprehensive evaluation [J]. Trans the Chin Soc of Agric Eng, 30(22): 201-208. [申宝营，李毅念，赵三琴，等，2014．暗期补光对黄瓜幼苗形态调节效果及综合评价[J]．农业工程学报，30(22)：201-208.]
SONG JL, 2016. RNA-Seq-transcriptome analysis of sex differentiation in cucumber seeding under different light quality[D]. Guangzhou: South China Agricultural University. [宋佳丽，2016. 光质调控黄瓜花性分化的转录组分析[D]. 广州：华南农业大学.]
WANG AM, XIAO W, DU WX, et al., 2001. The effect of light quality on growth and developmentof the test-tube seedlings of *Gypsophila* elegans [J]. J Xuzhou Norm Univ(Nat Sci Ed), (4): 56-58. [王爱民，肖炜，杜文雪，等，2001. 光质对缕丝花试管苗生长发育的影响［J］.徐州师范大学学报(自然科学版)，(4)：56-58.]
WANG Y, ZHANG YJ, HE MS, et al., 2018. Effect of light quality on plant morphology and growth [J]. J Anhui Agric Sci, 46(19): 22-25. [王燕，张亚见，何茂盛，等，2018.光质对植物形态结构和生长的影响[J]. 安徽农业科学，46(19)：22-25.]
WANG JQ, HE YY, WEI XT, et al., 2020. Effects of LED supplemental light on the growth and development of blueberry in greenhouse [J]. Acta Horticul Sin, 47(6): 1183-1193. [王佳淇，何莹钰，韦晓桐，等，2020. LED 补光组合对大棚越橘生长发育的影响[J]. 园艺学报，47(6)：1183-1193.]
WU Q, SU NN, CUI J, 2013. Effect of LED light treatments on growth and endogenous GA and IAA contents of tomato seedling [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 33(6): 1171-1176. [邬奇，苏娜娜，崔瑾，2013. LED 光质对番茄幼苗生长及内源性 GA 和 IAA 含量的影响[J]. 西北植物学报，33(6)：1171-1176.]
XIE MM, SUN YI, YIN LQ, et al., 2018. Effects of different LED light qualities on growth and physiological characteristics of *Heuchera* spp. Plantlets [J]. Mol Plant Breed, 16(6): 2001-2008. [谢苗苗，孙翊，殷丽青，等，2018. 不同 LED 光质对矾根组培苗生长和生理特性的影响[J]. 分子植物育种，16(6)：2001-2008.]
XU CH, LI JY, CUI MK, et al., 2013. Effects of supplemental lighting on growth and photosynthesis of tobacco leaves [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 33(4): 763. [徐超华，李军营，崔明昆，等，2013. 延长光照时间对烟草叶片生长发育及光合特性的影响[J]. 西北植物学报，33(4)：763.]
XU L, LIU SQ, QI LD, et al., 2007. Effect of light quality on leaf lettuce photosynthesis and chlorophyll fluorescence [J]. Chin Agric Sci Bull, 23(1): 96-100．[许莉，刘世琦，齐连东，等，2007. 不同光质对叶用莴苣光合作用及叶绿素荧光的影响[J]. 中国农学通报，23(1)：

96-100.]
YAMAGUCHI S, KAMIYA Y, 2001. Gibberellins and light-stimulated seed germination [J]. J Plant Growth Regul, 20(4): 369-376.
YAO TT, ZHU LQ, YANG S, et al., 2010. Effect of no on oxidative damage to mitochondrial membrane in harvested plum fruit [J]. Sci Agric Sin, 43(13): 2767-2774. [姚婷婷，朱丽琴，杨双，等，2010. 一氧化氮对采后李果实线粒体膜氧化损伤的影响[J]. 中国农业科学，43(13)：2767-2774.]
YIN J, 2016. Review of thermo-photoperiod development of wheat (*Triticum aestivum* L.) I. The vernalization and photoperiod response of wheat varieties [J]. J Tritic Crops, 36(6): 681-688. [尹钧，2016. 小麦温光发育研究进展Ⅰ.春化和光周期发育规律[J]. 麦类作物学报，36(6)：681-688.]
ZAMZAMI N, MARCHETTI P, CASTEDO M, et al., 1995. Reduction in mitochondrial potential constitutes an early irreversible step of programmed lymphocyte death *in vivo* [J]. J Exp Med, 181(5): 1661-1672.
ZHANG MM, ZHAO XH, WEI ZF, et al., 2018. Effects of different LED light quality on growth and physiological characteristics of *Crabapple* tissue culture seedlings [J]. Shandong Agric Sci, 50(10): 43-47. [张曼曼，赵晓红，魏宗法，等，2018. LED不同光质对观赏海棠组培苗生长及生理特性的影响[J]. 山东农业科学，50(10)：43-47.]
ZHANG QT, LIANG SW, CAO JB, et al., 2018. Effects of different intensity of LED yellow light on the growth, photosynthetic characteristics and saponins content of *P. polyphylla* var. *yunnanensis* [J]. Mod Food Sci & Technol, 34(3): 178-183. [张勤涛，梁社往，曹嘉芮，等，2018. 不同光强LED黄光对滇重楼生长、光合特性和皂苷含量的影响[J]. 现代食品科技，34(3)：178-183.]
ZHANG YT, ZHANG YQ, YANG QC, et al., 2019. Overhead supplemental far-red light stimulates tomato growth under intra-canopy lighting with LEDs [J]. J Integr Agric, 18(1): 62-69.
ZORATTI L, SARALA M, CARVALHO E, et al., 2014. Monochromatic light increases anthocyanin content during fruit development in bilberry [J]. BMC Plant Biol, 14 (1): 377.